

# 环境因素对混凝土结构特征参数影响的试验分析

闵志华<sup>1</sup>, 孙利民<sup>2</sup>

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 基于模型试验分析了环境因素对混凝土结构特征参数的影响, 包括环境温度和环境湿度. 首先对试验环境进行了介绍, 接着基于混凝土连续梁模型分析了环境温度对结构模态频率的影响, 尤其是结冰时的非线性效应. 最后基于混凝土试块分析了环境湿度对结构质量的影响, 发现具有明显的时间滞后效应.

**关键词:** 结构健康监测; 环境因素; 模型试验; 特征参数  
**中图分类号:** O 329; TU 311 **文献标识码:** A

## Test Analysis of Environmental Effect on Concrete Structural Feature Parameters

MIN Zhihua<sup>1</sup>, SUN Limin<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An experiment was made to investigate the environmental effect, including environmental temperature and humidity, on concrete structural feature parameters. First, the experiment condition was introduced. Then, based on a concrete continuous supported beam model, an analysis was made of the environmental temperature effect on structural modal frequencies, especially the nonlinear effect of freezing. Finally, the environmental humidity effect on structural mass was validated by a concrete block experiment. Results show that the humidity is of an obvious time-lag effect on structural mass.

**Key words:** structural health monitoring; environmental factor; model experiment; feature parameter

近年来, 许多大型桥梁和结构上都设计和安装了结构健康监测系统, 如香港的青马大桥、韩国的

Seohae 桥、中国的东海大桥和深圳市民中心等<sup>[1]</sup>. 大多数结构健康监测系统不仅测量结构响应, 如位移、加速度、应力等, 也监测结构所处的环境状况, 如温度、风速/风向、湿度、车辆荷载等. 这些健康监测系统在运营一段时间以后便会积累大量的监测数据, 如何基于这些监测数据对结构状态进行准确的评估是工程技术人员面临的一道难题. 结构的特征参数, 如模态频率、振型等, 是许多结构状态评估方法的基础, 因此分析结构特征参数的影响因素对准确地评估结构状态具有非常重要的意义. 已有的研究表明: 结构的特征参数除了受结构自身状态的影响外, 还会受环境因素、测量噪声、分析误差等的影响, 有时由于环境因素引起的结构特征参数的改变比结构损伤引起的改变大. 国内外的研究者对影响结构特征参数的环境因素进行了分析, 如文献[2-12]对影响结构动力特性的环境因素, 如温度、湿度、车辆荷载、风速等进行了分析, 但有以下两点不足: ①已有的研究是基于实际测试数据, 没有在试验室环境下研究环境因素的影响; ②环境湿度的影响只是定性分析, 没有进行机理分析和试验验证.

本文将在试验室环境下基于混凝土连续梁和混凝土试块两种模型分别分析环境温度、湿度对混凝土结构特征参数的影响, 尤其是结冰对结构模态参数的影响和环境湿度的时间滞后效应.

## 1 试验概述

试验选用混凝土连续梁和混凝土试块分析各种环境因素对结构特征参数的影响.

### 1.1 试验目的

(1) 分析不同环境因素对结构特征参数的影响, 包括环境温度和湿度.

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 中国博士后科学基金(20100480624); 土木工程防灾国家重点实验室项目(SLDRCE-08-A-05)

第一作者: 闵志华(1982—), 男, 博士后, 主要研究方向为结构健康监测与状态评估. E-mail: zhmin\_tj@hotmail.com

通讯作者: 孙利民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构健康监测与振动控制. E-mail: lmsun@tongji.edu.cn

(2)分析不同损伤工况下的结构模态参数的改变.

### 1.2 试验环境

为了准确模拟不同的环境温度和湿度,本试验设计了一个长 5.0 m,宽 1.5 m,高 1.9 m 的环境试验箱,并安装环境温度和湿度控制装置.箱体采用保温隔热板,四周设 6 扇  $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$  的观察窗,侧面设一道  $0.7\text{ m} \times 1.7\text{ m}$  的活动门.箱体总体布置如图 1 所示,试验箱外观和内部如图 2 所示.

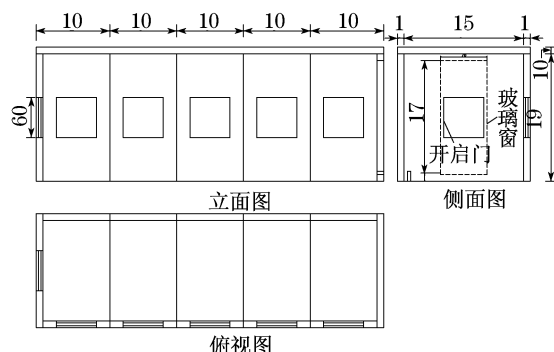


图 1 试验保温箱构造图(单位:cm)

Fig.1 Structure of environmental chamber(unit:cm)



图 2 试验箱体外观和内部

Fig.2 Exterior and interior environmental chamber

### 1.3 试验仪器

DH5920 动态数据采集仪;压电加速度传感器;温度计;信号发生器;激振器及功率放大器;湿度计;脉冲锤;电子天平.

## 2 环境温度影响试验

### 2.1 模型概述

采用 C15 混凝土制作了跨径为  $100\text{ cm} + 170\text{ cm} + 100\text{ cm}$  的三跨连续梁,截面宽  $20\text{ cm}$ ,高  $30\text{ cm}$ .截面内布设两层直径  $3\text{ mm}$  的细钢筋,每层 9 根.梁体立面布设如图 3 所示,试验模型如图 4 所示,采用脉冲锤进行激励.

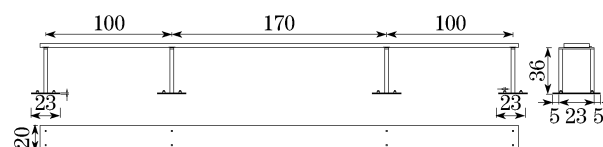


图 3 混凝土连续梁立面布置图(单位:cm)

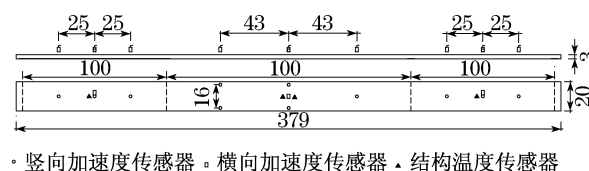
Fig.3 Concrete continuous-supported beam layout(unit:cm)



图 4 混凝土连续梁模型

Fig.4 Concrete continuous-supported beam model

连续梁上布设了 14 个加速度传感器和 4 个结构温度传感器,传感器的布设位置如图 5 所示.温度采样频率为  $0.5\text{ Hz}$ ,加速度采样频率为  $1\text{ 000 Hz}$ .



• 竖向加速度传感器 • 横向加速度传感器 • 结构温度传感器

图 5 混凝土连续梁传感器布设位置(单位:cm)

Fig.5 Sensors on concrete continuous-supported beam(unit:cm)

### 2.2 试验结果分析

分别对不同环境温度下的混凝土连续梁进行脉冲激励,测量结构自由衰减时的加速度响应,基于特征系统实现算法识别结构模态参数.

以 4 个结构温度测量值的加权平均值作为结构的有效温度,其加权公式如下:

$$T = \frac{0.90}{3.7} T_1 + \frac{0.95}{3.7} T_2 + \frac{0.95}{3.7} T_3 + \frac{0.9}{3.7} T_4$$

试验时每隔 4 min 对结构进行一次激励,取该段时间内有效温度的平均值作为该样本的结构温度.当结构温度在 0℃ 附近(0.06℃)时,结构模态参数的识别值如表 1 所示.模态振型的识别值和理论值如图 6 所示,可以看出两者具有较好的一致性.

表 1 模态参数的识别值和理论值的对比  
Tab.1 Comparison of the identified and calculated modal parameters

阶数	频率/Hz		MAC
	识别值	理论值	
1	19.474 3	19.500	0.976 2
2	43.743 9	42.743	0.937 7
3	50.308 3	50.380	0.989 7
4	65.172 3	72.699	0.976 6
5	124.589 6	131.090	0.977 6

注:MAC 表示 modal confidence criteria.

无损时结构模态频率和结构温度间的散点图如图 7 所示,从图中可以看出两者间具有较好的线性相关性,可以采用线性回归模型(式(1))分析两者间的关系.两者间的相关系数及线性回归的分析结果如表 2 所示.

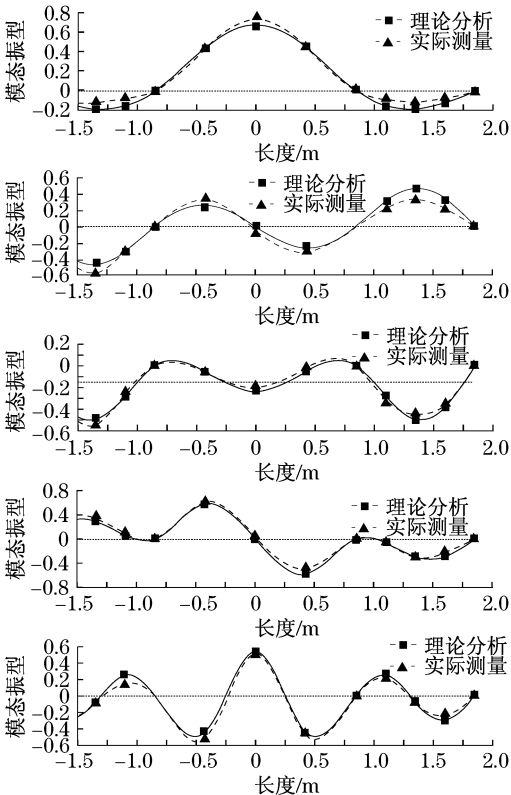


图 6 前 5 阶模态振型的识别值和理论值  
Fig.6 The first five identified and calculated modal shapes

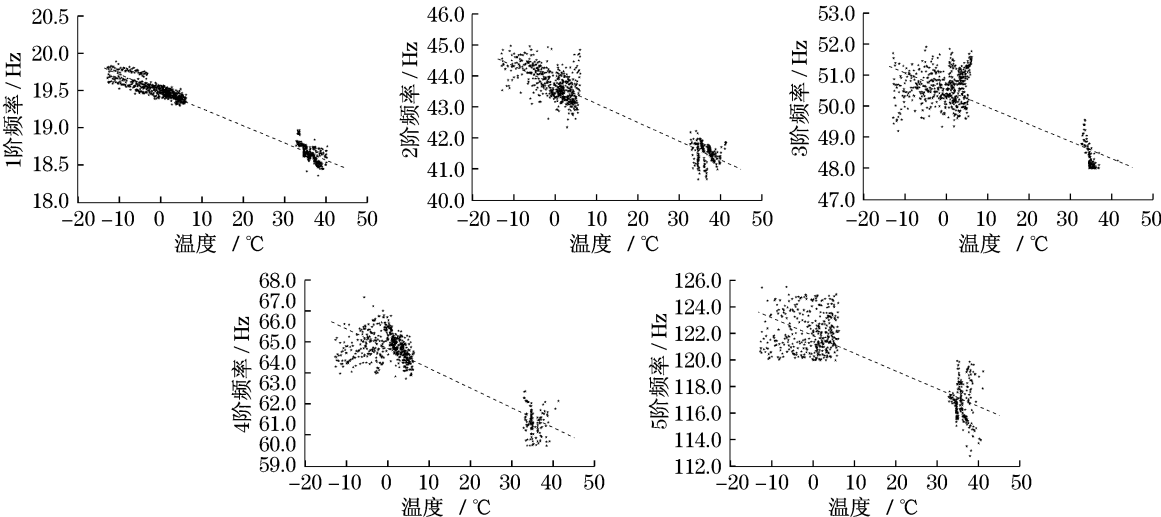


图 7 无损时结构模态频率与结构温度的散点图  
Fig.7 Scatter between structural modal frequencies and temperatures in non-damage condition

$$f = \beta_0 + \beta_1 T \tag{1}$$

式中: $f$  为模态频率; $T$  为结构温度; $\beta_0, \beta_1$  为模型回归系数.  
在无损状态测试完成后,在距右端 166~171 cm 处梁段的截面分别切割 20% 和 30%,模拟不同的损

伤状态.损伤 30% 时截面状况如图 8 所示.  
损失 20% 和 30% 时,1 阶和 5 阶模态频率与结构温度间的散点图分别如图 9,10 所示,两者的相关系数和线性回归结果分别如表 3,4 所示.

表 2 无损时模态频率的线性回归结果  
Tab.2 Linear regressional result of modal frequencies in non-damage condition

阶数	相关系数	$\beta_1$	$\beta_0$	$\beta_1/\beta_0$
1	-0.984 4	-0.023 1	19.49	-0.001 2
2	-0.946 5	-0.060 6	43.74	-0.001 4
3	-0.810 6	-0.055 4	50.55	-0.001 1
4	-0.894 6	-0.095 6	64.71	-0.001 5
5	-0.847 0	-0.133 4	121.87	-0.001 1

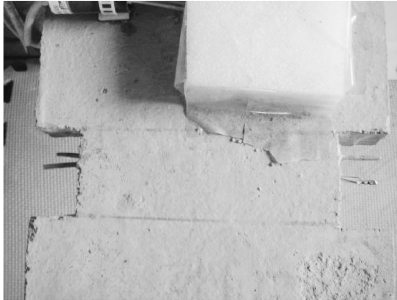


图 8 损伤 30%的状态  
Fig.8 Damage up to 30%

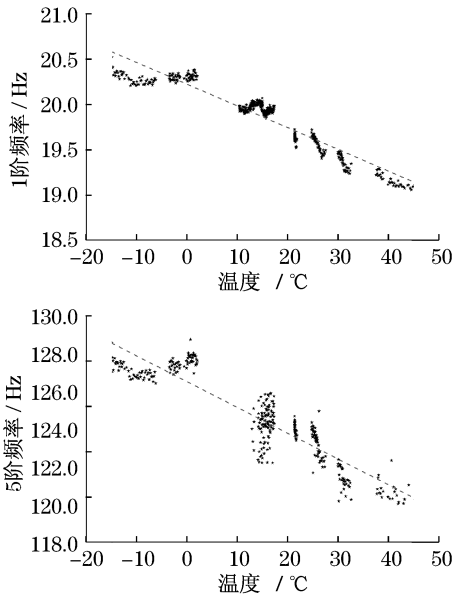


图 9 损伤 20%时第 1,5 阶模态频率与结构温度的散点图  
Fig.9 Scatter between the 1st and 5th modal frequencies and temperatures when damage is up to 20%

从不同状态的线性回归结果可以看出,大部分的  
结构模态频率与结构温度间的线性回归系数比 $\beta_1/\beta_0$   
介于-0.001 0~-0.001 5之间,具有良好的 consistency.

2.3 结冰的影响

文献[2-3]发现当环境温度在 0 °C 附近变化  
时,结构的模态频率与环境温度间具有明显的非线性

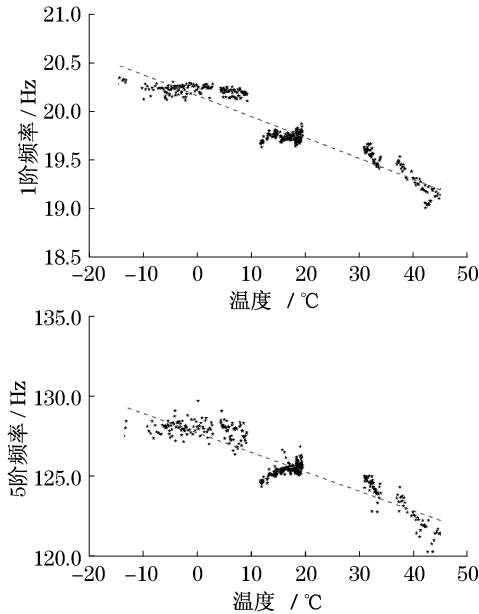


图 10 损伤 30%时第 1,5 阶模态频率和结构温度的散点图  
Fig.10 Scatter between the 1st and 5th modal frequencies and temperatures when damage is up to 30%

表 3 损伤 20%时模态频率的线性回归结果  
Tab.3 Linear regressional result of modal frequencies when damage is up to 20%

阶数	相关系数	$\beta_1$	$\beta_0$	$\beta_1/\beta_0$
1	-0.948 5	-0.02 4	20.22	-0.001 2
2	-0.942 8	-0.067 3	44.16	-0.001 5
3	-0.897 5	-0.072 2	54.74	-0.001 3
4	-0.843 8	-0.101 8	69.60	-0.001 5
5	-0.915 1	-0.136 9	126.52	-0.001 1

表 4 损伤 30%时模态频率的线性回归结果  
Tab.4 Linear regressional result of modal frequencies when damage is up to 30%

阶数	相关系数	$\beta_1$	$\beta_0$	$\beta_1/\beta_0$
1	-0.943 3	-0.021 6	20.13	-0.001 1
2	-0.921 3	-0.048 5	46.17	-0.001 0
3	-0.890 3	-0.059 0	54.51	-0.001 1
4	-0.897 0	-0.086 9	70.71	-0.001 2
5	-0.916 4	-0.120 2	127.62	-0.000 9

性关系,认为这是由于结构中的水在低于 0 °C 时发生  
结冰现象,使桥面铺装和梁能够整体工作,增大了  
结构的刚度。  
但前述试验表明,当梁体处于干燥状态时,结构  
模态频率在低于 0 °C 和高于 0 °C 时具有相同的变化  
规律,为此需要研究梁体在潮湿状况下结构模态频  
率随环境温度的变化规律.

在 15 ℃ 时对截面损伤 30% 的梁段进行加水渗透,待梁体完全被水渗透(图 11)后降温,达到 - 15 ℃ 时稳定 10 h,然后进行结构动力测试,分析在梁体湿润时结构动力特性随环境温度的变化规律.

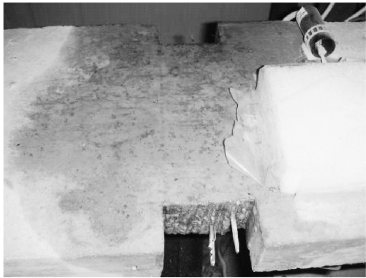


图 11 梁体湿润后的低温状态  
Fig.11 Low temperature condition of wet beam

梁体湿润时 1 阶和 5 阶模态频率随结构温度的变化规律如图 12 所示,从中可以看出,结构模态频率与结构温度间具有明显的非线性关系,可以分为  $T < - 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $- 3\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T > 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  3 个区间.当  $T < - 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,梁体中的水处于固体状态,能够与混凝土共同作用,两者的共同体处于稳定状态,结构模态频率与环境温度间具有线性关系.而当  $- 3\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,梁体中的水开始融化,处于融化状态的水开始脱离共同作用体,结构的整体刚度急剧下降.当  $T > 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,结构中的水已处于液态,不能够与梁体共同作用,梁体又处于一个相对稳定的状态.

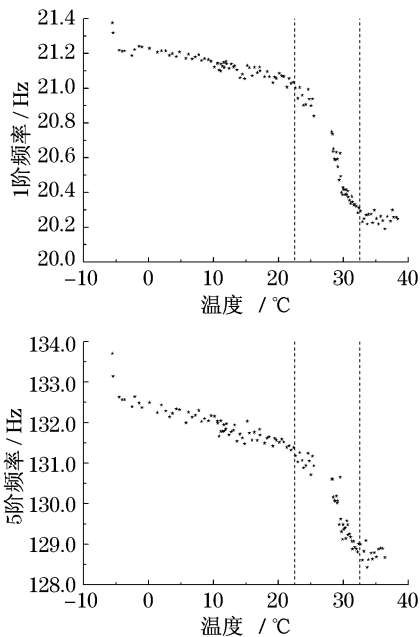


图 12 梁体湿润时第 1,5 阶模态频率和结构温度的散点图  
Fig.12 Scatter between the 1st and 5th modal frequencies and temperatures under wet beam condition

### 3 湿度影响试验

#### 3.1 试验模型

文献[4,6]认为环境湿度是通过改变结构的质量来影响结构的动力特性,但均没有通过试验验证.本文通过试验分析环境湿度对结构质量的影响.

预制 3 个 150 mm × 150 mm × 150 mm 的混凝土试块,每天定时测量其质量、环境温度和湿度,共计测量了 32 d.试验装置如图 13 所示.



图 13 湿度试验装置  
Fig.13 Humidity experimental instrument

#### 3.2 试验结果分析

3 个混凝土试件的质量随时间的变化如图 14 所示.试验结果统计值如表 5 所示,从表中可以看出单极差为 0.21%,双极差为 0.40%,且 3 个试块的结果具有良好的一致性.

表 5 试验结果  
Tab.5 Experimental result

参数	质量/g			湿度/%	温度/℃
	试块 1	试块 2	试块 3		
最小值	2 182	2 167	2 188	47	- 14
均值	2 186	2 172	2 192	89	20
最大值	2 190	2 175	2 196	99	45
单极差	- 0.002 1	- 0.002 1	- 0.002 1		
双极差	0.004 0	0.003 9	0.003 9		

注:单极差 = (最大值或最小值 - 均值),双极差 = (最大值 - 最小值)/均值.

试验湿度和温度的变化如图 15 所示,可以发现测量得到的湿度和环境温度间具有一定的相关性,即环境湿度随着温度的升高而会略有下降,尤其是在环境温度高于 35 ℃ 时湿度降低非常明显,因此将环境温度划分为低温 ( $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、常温 ( $0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、高温 ( $T > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 3 个温度区段.

不同温度区间试块质量和环境湿度间的散点图如图 16 所示.从图中可以看出,随着环境湿度的增加,混凝土试块的质量是逐渐增加的,但当湿度达到 99% 以后,试块质量急剧变化.

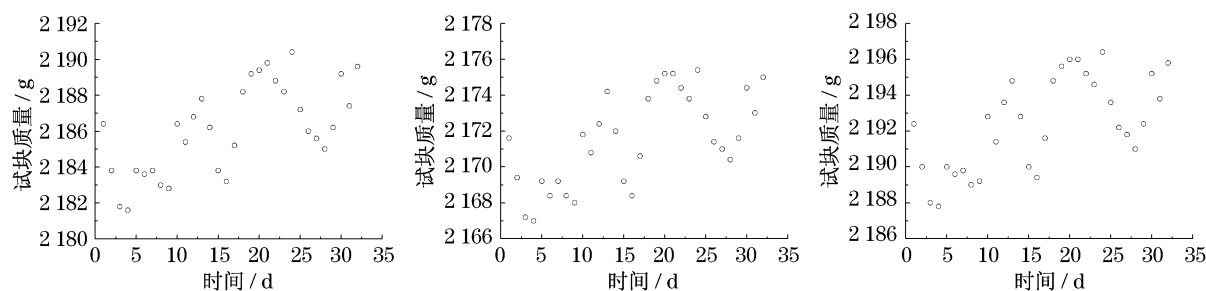


图 14 混凝土试块质量随时间的变化

Fig. 14 Time-varying concrete block mass

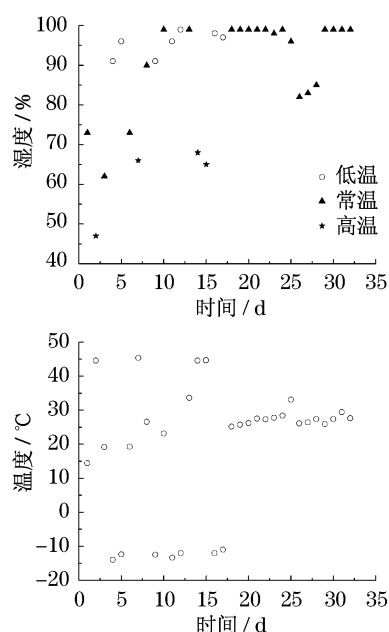


图 15 试验中湿度和温度的变化

Fig. 15 Humidity and temperature in experiment

环境湿度、温度和试块质量间的互相关系数如图 17 所示. 从图中可以看出, 湿度和试块质量间的互相关系数最大值是在滞后 1 d 时出现, 表明湿度对试块质量的影响具有明显的时间滞后性, 且滞后时间比温度对模态频率的滞后时间更长, 这也说明了湿度对结构质量的影响是一个缓慢的过程. 同时还可以看出滞后 2 d 的互相关系数比无滞后的互相关系数大.

环境温度和试块质量间的互相关系数在无滞后时达到最大, 在滞后 1 d 时达到最小, 表明环境温度对试块质量的影响没有时间滞后效应, 且与试块质量的相关系数要比湿度与试块质量间的相关系数小.

由于环境湿度对试块质量的影响具有一定的时间滞后性, 环境温度对试块质量的影响不具有时间滞后性, 因此分别建立两种回归方程: 式(2)只考虑湿度的时间滞后效应, 式(3)考虑了湿度的时间滞后

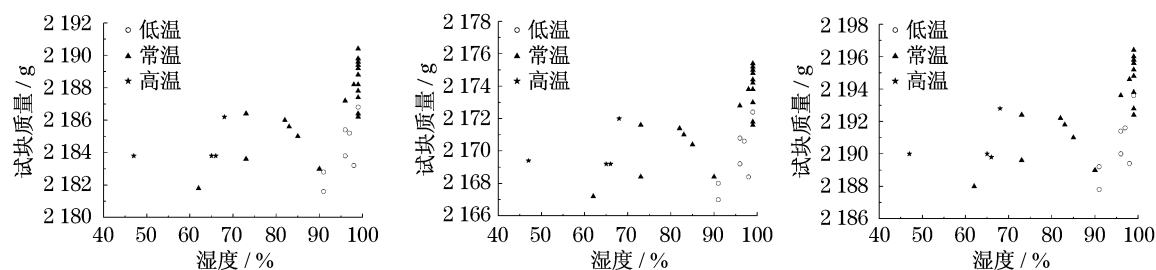


图 16 湿度和试块质量间的散点图

Fig. 16 Scatter between the humidity and block masses

效应和环境温度的影响. 回归分析结果如表 6 所示. 式(2)回归分析的复相关系数比直接基于当前时刻湿度回归得到的相关系数大很多, 同时解释的方差百分比要大 141.4%~148.0%, 增加幅度非常明显,

这表明不考虑湿度的时间滞后效应的回归分析是不合理的. 当增加了当前温度作为解释变量(式(3))后, 解释的方差百分比仅仅增加了 2.8%~4.1%, 改变的幅度较小.

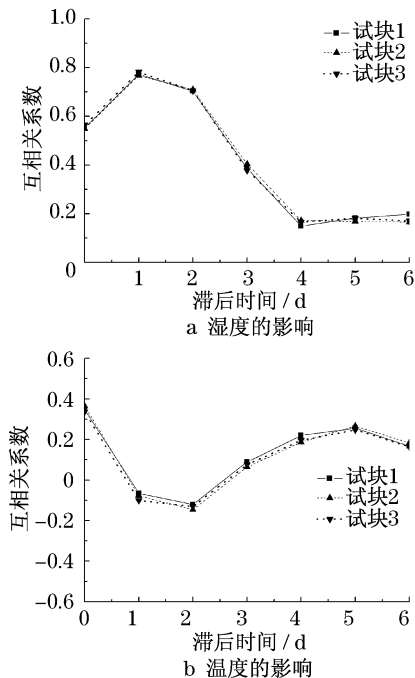


图 17 环境因素与质量的互相关系数

Fig.17 Correlation coefficient between environmental factors and block masses

$$m = \alpha_0 + \alpha_1 H_0 + \alpha_2 H_2 \tag{2}$$

$$m = \alpha_0 + \alpha_1 H_0 + \alpha_2 H_2 + \alpha_3 T_0 \tag{3}$$

式中:  $m$  为试块质量;  $H_0$  为当前湿度;  $H_2$  为滞后 2 d 的湿度;  $T_0$  为当前时刻的温度;  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  为模型回归系数.

表 6 回归得到的复相关系数

公式	复相关系数		
	试块 1	试块 2	试块 3
式(1)	0.907 8	0.911 0	0.914 1
式(2)	0.923 8	0.929 4	0.927 0

4 结论

- (1) 梁体处于干燥状态时,随环境温度的升高,结构的模态频率逐渐降低且具有较强的线性关系.
- (2) 混凝土结构处于潮湿状态时,模态频率随环境温度的变化具有较强的非线性关系,表明低温时结构中的水开始结冰,与结构形成整体共同承受荷载.
- (3) 环境湿度对结构质量的影响是一个缓慢的过程,具有明显的时间滞后效应,因此仅基于当前时刻的湿度作为解释变量进行回归分析是不恰当的.

参考文献:

[ 1 ] Sun L M, Sun Z, Dan D H, et al. Large-span bridge and their health monitoring systems in China[C] // Proceeding of 2007 International Symposium on Integrated Life-Cycle Design and Management of Infrastructure. Shanghai: Tongji University Press, 2007: 79 – 95.

[ 2 ] Peeters B, Maeck J, Roeck G D. Vibration-based damage detection in civil engineering: Excitation sources and temperature effects[J]. Smart Materials and Structures, 2001 (10): 518.

[ 3 ] Peeters B, Roeck G D. One-year monitoring of the z24-bridge: Environmental effects versus damage events[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30(2): 149.

[ 4 ] Sohn H, Dzwonczyk M, Erik G Straser, et al. An experimental study of temperature effect on modal parameters of the alamosa canyon bridge [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(8): 879.

[ 5 ] Abe M, Fujino Y, Yanagihara M, et al. Monitoring of hakucho suspension bridge by ambient vibration measurement[C] // SPIE. 3995. Newport Beach: [s. n. ], 2000: 237 – 244.

[ 6 ] Xia Y, Hao H, Zanardo G, et al. Long term vibration monitoring of an rc slab: temperature and humidity effect[J]. Engineering Structures, 2006, 28(3): 441.

[ 7 ] Ni Y Q, Hua X G, Fan K Q, et al. Correlating modal properties with temperature using long-term monitoring data and support vector machine technique[J]. Engineering Structures, 2005, 27 (12): 1762.

[ 8 ] Zhang Q W, Fan L C, Yuan W C. Traffic-induced variability in dynamic properties of cable-stayed bridge [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31: 2015.

[ 9 ] Li H, Li S L, Ou J P, et al. Modal identification of bridges under varying environmental conditions: temperature and wind effects [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2010, 17 (5): 495.

[ 10 ] 李爱群, 丁幼亮, 费庆国, 等. 润扬大桥斜拉桥模态频率识别的环境变异性 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37 (2): 245.

LI Aiqun, DING Youliang, FEI Qingguo, et al. Environmental variability in modal frequency identification of runyang cable-stayed bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(2): 245.

[ 11 ] 闵志华, 孙利民, 淡丹辉. 影响斜拉桥的模态参数变化的环境影响分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 102.

MIN Zhihua, SUN Limin, DAN Danhui. Effect analysis of environmental factors on structural modal parameters of a cable-stayed bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28 (10): 102.

[ 12 ] 闵志华, 孙利民, 淡丹辉. 台风下斜拉桥风致振动和动力特性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 1139.

MIN Zhihua, SUN Limin, DAN Danhui. Analysis of wind-induced response and dynamic properties of cable-stayed bridge under typhoon[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(9): 1139.